Ciencia e Ingeniería
Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías.
Año 2019, Enero-Junio, Vol. (6) N° (1), pp. 1-10. ISSN 2389-9484.
Universidad de La Guajira, Facultades de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingeniería.
La Guajira-Colombia.
Revista en Línea http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei



ANÁLISIS DE MODULACIÓN ÓPTICA EXTERNA EN DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

EXTERNAL OPTICAL MODULATION ANALYSIS IN SEMICONDUCTOR DEVICES

O. Silva[1], J. Viloria[2], C. Campos[2,] A. Castillo[2,] K. Maestre[2], K. Miranda[2], M. Ocampo[2]

1 Docente catedrático, Asignatura Física del Estado Sólido, Universidad del Magdalena.
2 Estudiante de Ingeniería Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena.

Recibido :agosto 13 de 2018 Aceptado: diciembre 20 de 2018

RESUMEN

En este documento se presenta una exploración de diferentes investigaciones científicas y tecnológicas aplicadas al campo de las comunicaciones, en donde se analizaron dos técnicas de modulación óptica externa: en fase y en amplitud, las cuales se ocupan de modular la señal portadora óptica de forma externa al láser semiconductor del transmisor, con el objetivo de fundamentar el comportamiento físico de estos moduladores, sus parámetros básicos (índice de transmisión, reflexión, absorción), su composición espectral y la intensidad lumínica que genera el láser ante un tiempo constante (láser de onda continua). Gracias a ello se logró establecer las diferencias, ventajas y desventajas de los dos tipos de modulación óptica externa y finalmente se identificó que la modulación óptica externa en amplitud, es la técnica más eficiente ya que no presenta distorsión, transmite una mayor potencia, transfiere una gran cantidad de información en lapsos de tiempo muy cortos, no genera pérdidas y no se ve afectada por el fenómeno de dispersión cromática en la fibra óptica. Sin embargo, si se reemplaza el cristal de por el grafeno mejora la respuesta del modulador, pero limita su operación de trabajo a una longitud de onda cercana al infrarrojo, por lo tanto, se concluye que al utilizar otros materiales de naturaleza semiconductora se amplía el estudio de la modulación óptica, y la empleabilidad varía según las aplicaciones y el enfoque.

Palabras claves: Modulación óptica externa, fibra óptica, láser semiconductor, cristal , Mach-Zehnder..

ABSTRACT

This paper presents an exploration of different scientific and technological research applied to the field of communications, in which two techniques of external optical modulation were analyzed: in phase and in amplitude, which are concerned with modulating the optical carrier signal externally to the semiconductor laser of the transmitter, in order to base the physical behavior of these modulators, their basic parameters (transmission index, reflection, absorption), their spectral composition and the luminous intensity generated by the laser at a constant time (wave laser keep going). Thanks to this it was possible to establish the differences, advantages and disadvantages of the two types of external optical modulation and finally it was identified that the external optical modulation in amplitude, is the most efficient technique since it does not present distortion, it transmits a greater power, it transfers a large amount of information in very short periods of time, does not generate losses and is not affected by the phenomenon of chromatic dispersion in the optical fiber. However, if the crystal is replaced by graphene, it improves the modulator response but limits its operation to a near-infrared wavelength, therefore, it is concluded that when using other materials of semiconductor nature, it expands the study of optical modulation, and employability varies by application and approach.

Keywords: External optical modulation, optical fiber, semiconductor laser, crystal, Mach-Zehnder.

1. INTRODUCCIÓN

La modulación óptica es comúnmente utilizada en sistemas de comunicación para transmitir información a través de los enlaces de fibra óptica, ya que superponer la información en una señal luminosa. En otras palabras, la modulación es el proceso de convertir una señal eléctrica en una señal óptica (Álvarez & Vázquez Quiroz, 2013), para que la transmisión de datos sea más sencilla, más rápida y menos costosa. Las señales que contienen la información no siempre pueden ser transmitidas de manera directa, por lo tanto, existen diferentes técnicas de modulación óptica, que depende de la naturaleza de la señal y el canal por el que será transmitida. Así pues, existen básicamente dos grandes grupos de tecnologías de modulación óptica ampliamente extendidas: generación de la portadora óptica con láseres modulados directamente (modulación directa), o mediante dispositivos externos al láser que module luz radiada por los mismos antes de su acoplo a fibra (modulación externa) (Macho Ortiz, 2012).

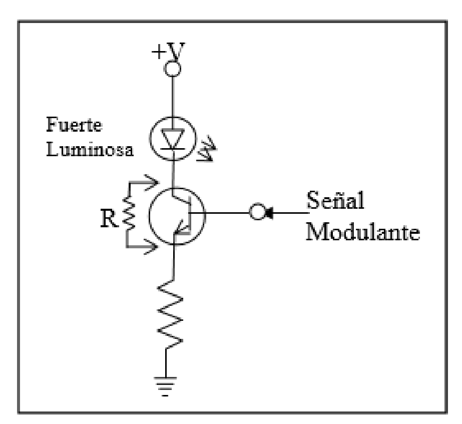


Ilustración 1. Circuito básico de modulación directa.

En estudios de identificación rápida de gases altamente tóxicos se hace uso del método de modulación óptica para ejercer impulsos periódicos sobre sensores electroópticos de gas de óxido metálico (MOX), que al entrar en contacto con un gas a temperatura constante hace que el estado de superficie del MOX cambie y obtener los diferentes espectros (Lei, Deng, Zhang, Cai, & Xie, 2016). Existen otros estudios que involucran la modulación óptica por el simple hecho de que alcanza velocidades altas, son más robustos y de fácil fabricación comparado con otros moduladores matemáticos. Liu, y otros (2011) en primer lugar, han demostrado que un modulador óptico basado en grafeno trabaja en una región de 1,35 - 1,6 , y destacó su velocidad de modulación. Sin embargo, la energía de Fermi del grafeno en este dispositivo todavía limita su región de trabajo a la longitud de onda del infrarrojo cercano y se necesita una guía de onda óptica para mejorar la interacción del grafeno y la luz (Wang, y otros, 2017). En los últimos años, Polat & Kocabas (2013), han propuesto un electrolito cerrado de grafeno supercapacitor con estructura de un modulador óptico, y demostraron que la concentración del portador puede aumentarse adicionalmente y la modulación puede extenderse a una región de luz visible tan baja como 450 . Similarmente el método cerrado también se ha utilizado en los Tera Hz y la región de microondas, y ha demostrado significativamente mayor profundidad de modulación (Wu, y otros, 2015). Particularmente este tipo de modulador puede funcionar sin guía de ondas óptica, es decir, que la luz espacial puede ser manipulada (Wang, y otros, 2017).

Los fenómenos de emisión, detección y absorción de luz son fundamentales en las comunicaciones ópticas y se basan en los intercambios fotón-electrón que tienen lugar en ciertos materiales y dispositivos semiconductores. La ecuación (1) describe este fenómeno. Por un lado, la emisión de fotones se da como consecuencia de la inyección de electrones en las fuentes ópticas. Por el otro, la absorción de fotones por parte de los detectores ópticos (principalmente diodos) producen una corriente eléctrica (Cardona Fernandéz & Fernández Campos, 2010).

$$E_g \approx h\upsilon \Rightarrow \lambda \approx \frac{h\upsilon}{E_g} \qquad (1)$$

Los formatos empleados en comunicaciones ópticas no difieren en esencia de los empleados en otros sistemas: modulación en la amplitud, en la frecuencia o en la fase de la portadora en cuestión, para codificar la información. Generalmente se emplea un diodo láser de semiconductor como fuente de luz, la cual puede salir modulada directamente del láser o pasa por una etapa de modulación externa a la fuente (Macho Ortiz, 2012). El receptor está compuesto por un sensor electroóptico que permite llevar la señal del dominio óptico al dominio eléctrico como se puede apreciar en la Ilustración 2 (Perilla Martinez, 2015).

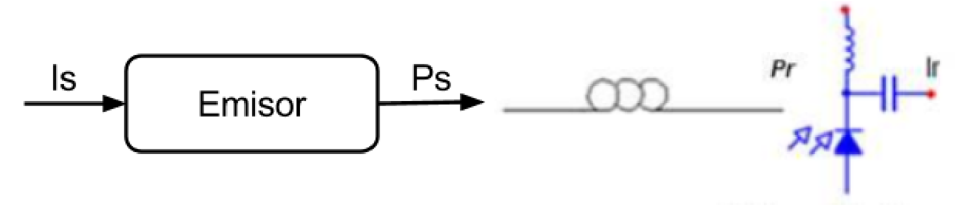


Ilustración 2. Representación de un sistema de comunicación por fibra óptica.

Mejorar el ancho de banda de modulación de los láseres semiconductores ha recibido mucha atención en aplicaciones tecnológicas de transmisión que requieran una densa información, como la banda ancha de radio sobre fibra (RoF) (Ahmed & Bakry, 2015). Se han aplicado varios esquemas para aumentar el ancho de banda de la modulación del láser semiconductor, incluyendo múltiples estructuras de pozos cuánticos (Sato, Kuwahara, & Miyamoto, 2005). El mejoramiento en el ancho de banda permitirá más concentración de potencia de la señal (Balci, Polat, Kaknov, & Kocabas, 2015). Pero la fibra óptica tiene dos limitantes principales: la atenuación y la dispersión. La atenuación lleva a la pérdida de potencia de la señal fotónica y esto limita en gran medida la distancia de transmisión que puede lograr la señal (Perilla Martinez, 2015). La difracción es el fenómeno físico que ocurre en las fronteras entre las zonas de alta y baja constante dieléctrica, la periodicidad del cristal debe ser del mismo orden de magnitud que la longitud de onda en la que se pretende trabajar.

Para lograr un análisis de modulación desde el punto de vista óptico se debe considerar que una de las características esenciales de los semiconductores es la existencia de un “GAP” de energía prohibida entre la banda de valencia y la de conducción. El valor de ese GAP oscila entre amplios márgenes, variando para los semiconductores conocidos entre los 0,16 eV del InSb hasta los 3,6 eV del ZnS. Para que un electrón situado en el techo de la banda de valencia pase al fondo de la banda de conducción hay que

comunicarle una energía igual a la anchura del GAP, tal y como se muestra en la Ilustración 1. Esta energía puede ser de origen térmico, electromagnético, etc. (Universidad Complutense de Madrid, 2001).

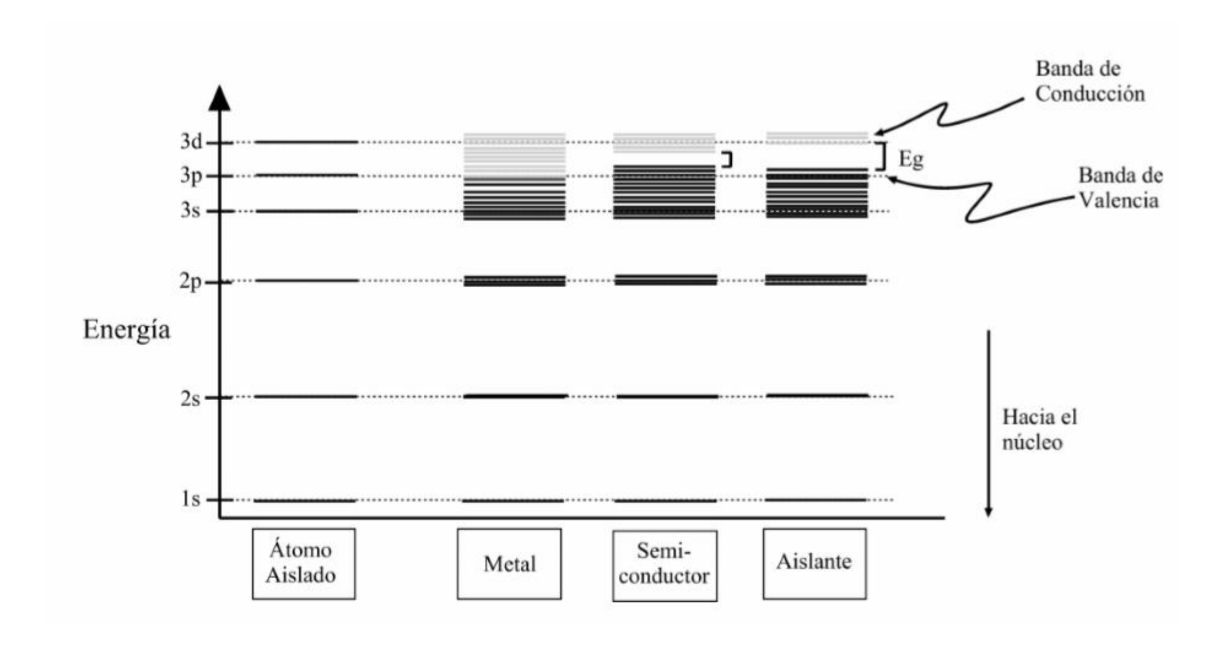


Ilustración 3. Anchura del GAP en los diferentes materiales.

El material de un láser semiconductor, es un cristal semiconductor al que se le ha dopado con huecos en una zona (zona p) y con electrones por otra (zona n), obteniendo así la conocida unión p-n, o lo que es lo mismo, un diodo semiconductor (Estandía Rodríguez, 2015).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con esta investigación se pretende analizar cómo la habilidad de modular la luz, es decir modificar su intensidad y/o fase, influye en la variación de sus índices de refracción, transmisión y reflexión cuando el material es un semiconductor; con el interés de documentar la fundamentación física que describe estos fenómenos.

Como las constantes ópticas no pueden ser obtenidas por medio de medición directa, se hace necesario emplear el método de modulación externa conocido como modulador electroóptico externo (EOM), el cual se subdivide en modulación electroóptica de fase que modula directamente la onda luminosa, y la modulación electroóptica de amplitud (o de intensidad), en donde se debe hacer uso de un láser semiconductor para lograr modular la intensidad lumínica.

2.1 Modulación Electroóptica de Fase

Para generar una señal de fase modulada se requiere una guía de onda en un cristal llamado Niobato de Litio con difusión de Titanio ( ) que se emplea en la fibra óptica monomodo rectilínea, para que se produzca una interacción electroóptica y se induzca un cambio en sus índices de refracción, cuyo valor depende del campo eléctrico aplicado a la entrada de la guía (ecuación (2)). La ecuación (3) indica que el campo eléctrico sufrió una pequeña modificación cuando salió de la guía de onda.

$$E_{in}(t) = E_0 e^{(iw_0 t - ky)} \quad (2)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.1)$$

$$E_{out}(t) = E_0 e^{[i(w_0 t - \varphi y E)]} \quad (3)$$

La Ilustración 4 obedece a un modulador llamado traveling-wave y se hace en estructuras de microondas.

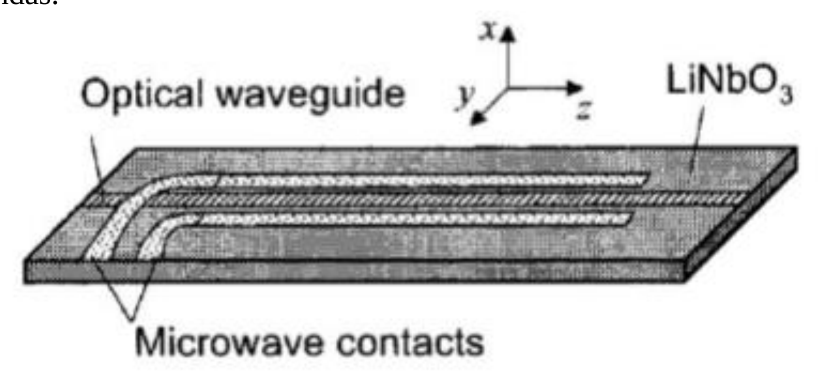


Ilustración 4. Guía de onda de un modulador de fase.

La luz, al salir de la guía de onda provoca que la fase se encuentre en función del campo eléctrico aplicado. La ecuación (4) describe el fenómeno de refracción del material.

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_0^3 r_3 E_{in} \quad (4)$$

Donde; es el índice de refracción en función del campo eléctrico, es el coeficiente electroóptico del modulador. El valor del coeficiente electroóptico del es de 328 , y es el índice de refracción material de la onda. Considerando el efecto Pockels, el cambio de fase se expresa como:

$$\Delta\varphi_0 = \frac{2\pi \Delta n L_i}{\lambda_0} = \pi n_r^3 r_3 \frac{V L_i}{d\lambda_0} (rad) \quad (5)$$

Lo anterior obedece a que la señal óptica se encuentra viajado en el vacío. El voltaje que en este caso representa una señal de información (audio, video, imagen), debe tener la energía suficiente y necesaria como para que logre provocar un desplazamiento de fase de 180°. Este voltaje se define como , que es el voltaje de media onda que se aplica cuando el cambio de fase se realiza por media longitud de onda o por , característica propia del modulador de fase. La magnitud del campo eléctrico está dada por $E = \frac{V(t)}{d} \ (volts/m)$. Sustituyendo esta relación se obtiene la ecuación (6).

$$V_\pi = \frac{d\lambda_0}{n_r^3 r_3 L_i} \quad (6)$$

En el diseño de un modulador de fase, uno de los principales objetivos es reducir el valor de la tensión para consumir la menor potencia eléctrica posible durante la modulación (Macho Ortiz, 2012). La Ilustración 4 muestra el diseño de un modulador de fase traveling-wave, dicho anteriormente. Esta implementación es más real que la que se describe en la Ilustración 5, puesto que se comporta como un condensador: un dieléctrico embebido entre dos superficies conductoras sobre las que se aplica una tensión eléctrica externa. Aunque las dos aplicaciones responden de igual forma, en la práctica el capacitor no deja de ser una aplicación puramente didáctica, en cambio la luz en el modelo traveling-wave viaja por la guía de onda óptica y la señal eléctrica modulada viaja por los contactos de microondas que rodean a la guía.

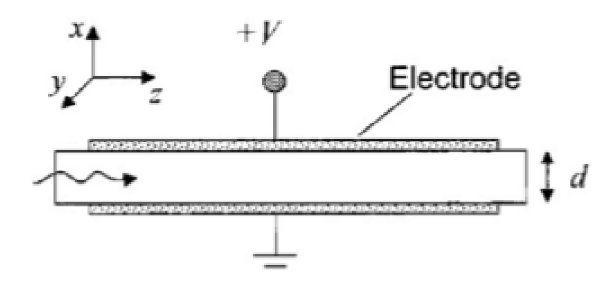


Ilustración 5. Estructura básica del funcionamiento de un modulador óptico de fase.

2.2 Modulación Electroóptica de Amplitud

Este modelo actúa como un modulador de intensidad óptica mediante un láser de material semiconductor que propaga la luz y puede alterar las fases sobre la señal pulsada limitando su distancia de propagación. Frecuentemente la cavidad resonadora del láser o espejos se obtiene mediante el pulido del cristal semiconductor del que está hecho el medio activo, lo que aumenta significativamente su reflectividad. El medio activo puede ser excitado de tal manera que cuando un fotón a una determinada longitud de onda viaja por el medio activo tiene más probabilidad de inducir una emisión estimulada que de ser absorbido. Cuando se está en estas condiciones la estadística dispone que una señal óptica de la misma frecuencia que la del fotón considerando atravesando el medio activo verá amplificada su intensidad (Estandía Rodríguez, 2015).

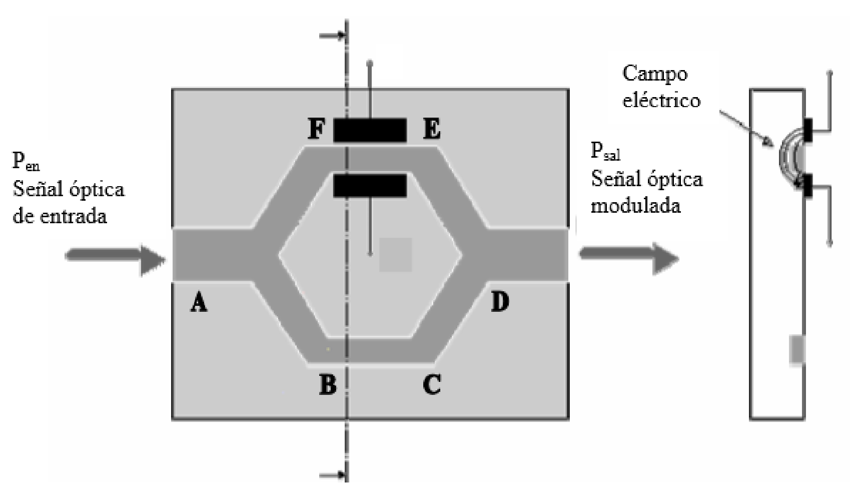


Ilustración 6. Esquema general de un modulador de intensidad tipo Mach-Zehnder.

El modulador de amplitud está basado en una estructura interferométrica Mach-Zehnder muy similar a la guía de onda que observamos en la Ilustración 4, con la única diferencia de que a la salida de la guía la onda es dividida en dos y se obtiene una señal modulada en fase y otra en amplitud que depende del desfase introducido en ambos extremos del interferómetro. En la Ilustración 6 podemos observar que se realiza una superposición de las ondas que viajan en los brazos del interferómetro, para obtener así la potencia de salida dada por la ecuación (7).

$$P_{out} = \frac{1}{2}P_{in} + \frac{1}{2}P_{in}\cos(\Delta\varphi) \quad (7)$$

La relación que describe el recorrido de campos ópticos paralelos varía cosenoidalmente con la diferencia de fase. Teniendo en cuenta que la fase varía en intervalos de se generaría un campo asimétrico parecido a una guía de onda de segundo orden.

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{2}[1 + \cos(\Delta\varphi)] \quad (8)$$

La señal de control inyectada al modulador es una diferencia de potencia de media onda. La relación de potencias se encuentra dada por la ecuación (9), aunque teóricamente la potencia de salida debe ser proporcional a la potencia de entrada, en la práctica existen variaciones en estos parámetros, siempre habrá un brazo que contenga más señal que el otro.

$$\frac{|E_{out}|^2}{|E_{in}|^2} = \cos^2\left(\frac{\pi V(t)}{2V_\pi}\right) \quad (9)$$

La relación intensidad-potencia representada en la Ilustración 7 se encuentra en los detectores de ley de cuadratura que están correlacionados linealmente.

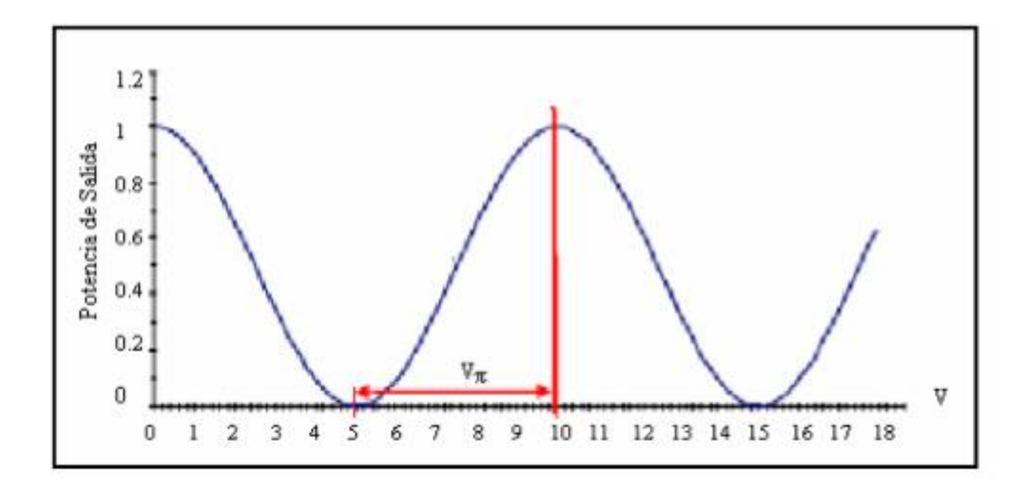


Ilustración 7. Representación gráfica de la relación de voltaje contra potencia de salida del modulador.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos numéricos obtenidos al reemplazar valores en las ecuaciones anteriores, describen los fenómenos físicos propios de la modulación. De los resultados se puede decir que el modulador de fase óptica al estar bajo la influencia de dos elementos polarizadores de mayor longitud se convierte en un modulador de intensidad. Es por esto que el modulador externo de amplitud generalmente provee a los sistemas digitales mejor calidad en la señal generada ya que alcanza velocidades de transmisión alta, y lo convierte en el modelo favorito empleado en las comunicaciones ópticas (televisión por cable). Por ejemplo, si se desea diseñar un modulador de fase que se propague a , con un coeficiente electroóptico , una separación y un , el voltaje de media onda sería de , con una longitud de separación entre electrodos de apenas . Lo cual indica que es una relación lineal, es decir que la fase es proporcional al voltaje aplicado. Pero si se desea cambiar la separación entre electrodos con , el voltaje de media onda , lo cual comprueba que, al cambiar la longitud de separación, el modulador de fase se comporta como un modulador de intensidad proporcional al voltaje aplicado en los electrodos de la guía de onda.

Las definiciones consignadas en este estudio jugaron un papel muy importante en el análisis de moduladores electroópticos externos de fase y de amplitud basados en el modelo óptico dado por el cristal , en donde se determinó que este tipo de material es sensible a las variaciones de luz, temperatura e incidencia eléctrica. Por lo tanto, se estableció ampliar el análisis teórico y estudiar el comportamiento de otros materiales que puedan brindar una mejor repuesta y más velocidad en la transmisión de información por fibra óptica. Como en el caso del modulador óptico basado en grafeno que proporciona mejoras en la velocidad de transmisión, pero que este solo se limita a trabajar en la longitud de onda cercana al infrarrojo, abriendo la posibilidad de hacer mejoras en la interacción de la guía de onda con el grafeno para evitar pérdidas; o en la implementación de otros tipos de modulación conocida como QPSK (desplazamiento de fase en cuadratura) con una estructura MIMO (múltiple-input múltiple-output) que puede proporcionar 120 Gb/s (4x30 Gb/s) de transmisión de señal (Li, y otros, 2013). Esta tasa de bits es compatible con el actual 100 G producto comercial coherente QPSK. Lo ideal es que cuando ocurra un fenómeno geográfico el enlace de fibra no se corte, por lo que utilizaron la comunicación sin hilos de longitud de onda del orden de los milímetros basada en un ancho W para realizar la conexión rápida (Zhang, 2017).

Recientemente otros estudios han demostrado que se puede lograr un enlace de integración inalámbrica óptica en la banda W con la técnica de modulación de fase de conversión descendente y modulación de amplitud en cuadratura 16QAM (Li, Yu, Xiao, & Xu, 2014). La distancia de entrega inalámbrica es de sólo 1 m desde 16QAM puesto que necesita alta sensibilidad en el receptor. En comparación con otras señales QAM de alto orden, la señal QPSK tiene una sensibilidad de receptor más alta (Yu & Zhang, 2016), y por lo tanto puede ser entregada a través de una distancia más larga por cable o inalámbrica.

4. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que no es posible descartar una tecnología de modulación ante la otra, debido a que de acuerdo a la aplicación que se vaya a implementar determinará la mejor tecnología para poder obtener los mejores resultados, ejemplo de ello es que el grafeno limita su operación a bandas cercanas al infrarrojo impidiendo así una multicanalización de longitud de onda lo cual permitiría trasmitir información a través del espectro visible.

Una de las principales ventajas de los moduladores externos Mach-zehnder es que estos tienen una mayor velocidad de modulación debido a que no se basan en la movilidad de los electrones en el diodo semiconductor, por lo tanto, su aplicación se encuentra en los sistemas digitales de alta velocidad. Pero que el desajuste en las velocidades de fase entre la señal óptica y eléctrica en cada rama del dispositivo limita su ancho de banda.

El análisis solo fue realizado con las características de un solo material semiconductor en cuestión, puesto que era el más empleado en este tipo de modulación, pero existen otras aplicaciones en donde se implementan otros tipos de materiales que brindan más prestaciones. Lo que nos permite la posibilidad de desarrollar modulaciones de con diversos fenómenos ópticos, como es el caso del efecto de chirp que en ocasiones se da en la modulación directa. Aunque este tipo de modulación no fue objeto de estudio, no se descarta del todo su comportamiento.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ahmed, M., & Bakry, A. (7 de October de 2015). Modulation Performance of semiconductor laser coupled with an ultra-short external cavity. Optics Communications 360, 52 - 60. doi:10.1016/j.optcom.2015.10.028

Álvarez, A., & Vázquez Quiroz, A. (19 de Marzo de 2013). Modulación óptica (Directa y Externa). Recuperado el 7 de Abril de 2017, de https://prezi.com/zgz0g5wjjmnk/modulacion-optica/

Balci, O., Polat, E., Kaknov, N., & Kocabas, C. (2015). Graphene-enable electrically switchable radar-absorbing surfaces. Nat Commun, 6. Recuperado el 7 de April de 2017

Cardona Fernandéz, J., & Fernández Campos, L. (2010). Estudio de técnicas de modulación para enlaces ópticos. Universidad Politécnica de Catalunya, Escuela Politécnica Superior Castelldefels. Recuperado el 8 de Abril de 2017

Estandía Rodríguez, S. (2015). Dinámica de láseres de semiconductor sometidos a retroalimentación óptica. Universidad de Cantabria, Facultad de ciencias. Recuperado el 8 de Abril de 2017

Lei, T., Deng, Q., Zhang, S., Cai, S., & Xie, C. (2016). Fast identification of CO by using single Pt-modified WO3 sensing film based on optical modulation. Sensors and Actuators B: Chemical, 506 - 513. doi:10.1016/j.snb.2016.04.001

Li, X., Yu, J., Dong, Z., Zhang, J., Chi, N., & Yu, J. (2013). Investigation of interference in multiple-input multiple-output wireless transmission at W band for an optical wireless integration system. Optics Letters, 38(5), 742 - 744. doi:10.1364/OL.38.000742

Li, X., Yu, J., Xiao, J., & Xu, Y. (2014). Fiber-wireless-fiber link for 128-Gb/s PDM-16QAM signal transmission at W-band. IEEE Photonics Technology Letters, 26(19), 1948 - 1951.

Macho Ortiz, A. (2012). Estudio y caracterización de un modulador electroóptico Mach-Zehnder. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Recuperado el 8 de Abril de 2017

Perilla Martinez, V. (2015). Análisis del amplificador óptico de semiconductor y su aplicación a sistemas de regeneración de onda 2R. (G. Puerto Leguizamón, Ed.) Bogotá DC. Recuperado el 8 de Abril de 2017

Polat, E., & Kocabas, C. (11 de December de 2013). Broadband optical modulators based o graphene supercapacitors. Nano Lett, 13(12), 5851 - 5857. doi:10.1021/nl402616t

Sato, K., Kuwahara, S., & Miyamoto, Y. (2005). Chirp characteristics of 40-gb/s directly modulated distributed-feedback laser diodes. Journal of lightwave technology, 23(11), 3790 - 3797. doi:10.1109/JLT.2005.857753

Universidad Complutense de Madrid. (2001). Laboratorio de dispositivos. Facultad de ciencias físicas, Madrid. Recuperado el 8 de Abril de 2017

Wang, H., Zhou, Y., Xu, X., Zhu, L., Xia, W., Qi, M., . . . Ren, Z. (31 de January de 2017). Optical modulation characteristics of graphene supercapacitors at oblique incidence in visible-infrared region. Solid-State Electronics An international Journal, 1-8. doi:10.1016/j.sse.2017.01.014

Wu, Y., La-o-vorakiat, C., Qiu, X., Liu, J., Deorani, P., Banerjee, K., . . . Yang, H. (3 de February de 2015). Graphene terahertz modulators by ionic liquid gating. Adv Mater, 27(11), 1874 - 1879. doi:10.1002/adma.201405251

Yu, J., & Zhang, J. (May de 2016). Recent progress on high-speed optical transmission. Digital Communications and Networks, 2(2), 65 - 76. doi:j.dcan.2016.03.002

Zhang, Y. (2017). Optical wireless integration based on phase modulator down-conversion for W-band QPSK signal delivery. Optics Communications, 140 - 143. doi:10.1016/j.optcom.2016.12.078